

トルコ・コジャエリ地震による交通施設の被害概要

川島一彦¹・橋本隆雄²・鈴木 猛康³

¹正会員 工博 東京工業大学土木工学科（〒152-8851 東京都目黒区大岡山2-12-1）

²正会員 千代田コンサルタント都市計画部（〒102-0072 東京都千代田区飯田橋3-3-7）

³正会員 工博 熊谷組技術研究所（〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪1043）

1. はじめに

1999年8月17日午前3時2分、トルコ北西部の工業都市Kocaeli（コジャエリ、旧名Izmit）の南約11kmを震央とするM7.4（Richter Scale）の地震が発生した。本地震は北アナトリア断層帯の右横ずれ断層によって発生したもので、トルコでもっとも人口の密集した地域を襲い、18000人以上の人命を奪った。筆者らは、土木学会トルコ地震被害調査団の交通施設調査班として、9月5日より9月11日まで被災地の被害調査を実施したので、コジャエリ地震による橋梁と鉄道の被害状況の概要を報告する。

図-1に調査ルートを示す。断層はMarumara Seaの海底から一旦Gölcükに上陸し、再度海底下に消失してからIzmit湾の南に再上陸し、Sapanca湖を經由してAkyaziまで、ほぼ東西方向に走っている。道路は、高速道路（Motorway）が2本東西方向に走り、

一方鉄道は、IstanbulとAnkaraを結ぶ東西系と南から北上してSakarya（旧名Adapasari）に終着する南北系の2本がある。

以下に、これらの道路、鉄道と断層が交わる箇所、発生した代表的な被害例を示す。

2. 道路施設の被害

(1) 概要

コジャエリ地震では、主としてKocaeliより東の地震断層に沿った地域で道路施設に被害が発生した。湿地帯に盛土して建設された高速道路の沈下や橋台取り付け部における段差等、我が国でもよく見られる被害の他、断層が道路を横断したり、橋梁を横切ることにより、断層変位そのものが道路施設に甚大な被害を与えた。また、断層変形に伴い、断層に比較的近い領域では右横ずれの大きな地盤の塑性変形

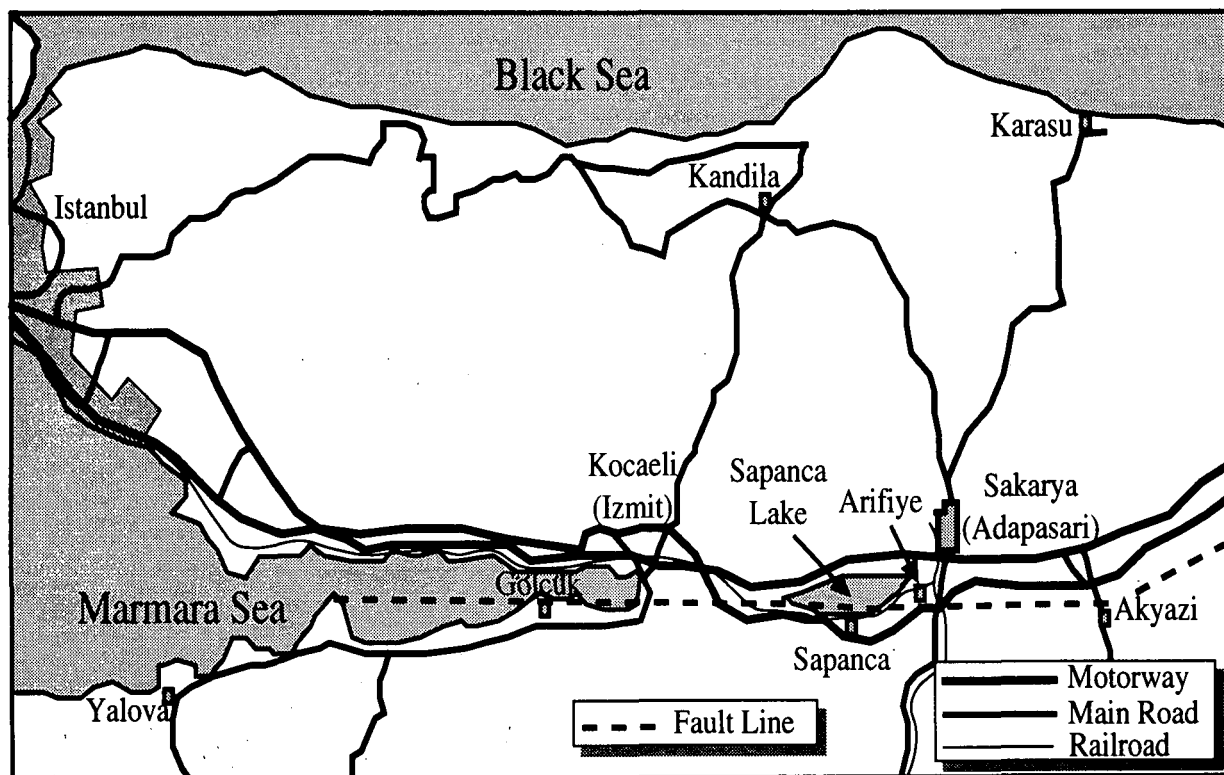
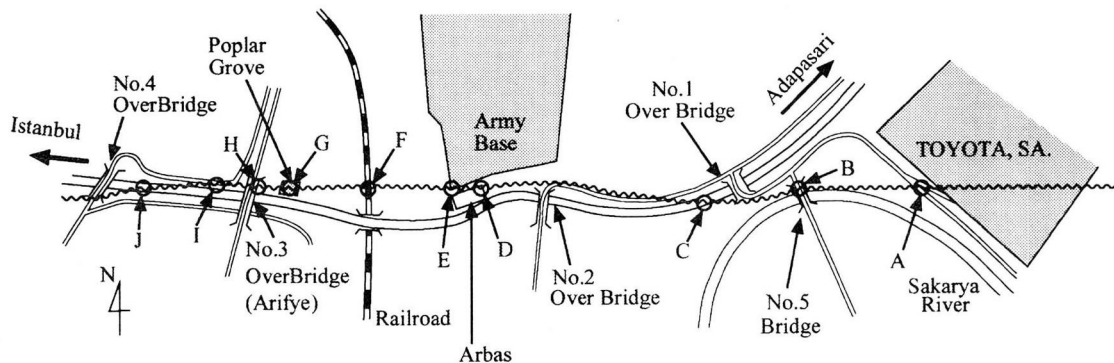


図-1 調査ルートの主要な鉄道、道路の配置と断層



図－2 Arifiye地点周辺の高速道路のオーバース橋梁、河川橋梁と地震断層の関係

が発生、これが橋梁の下部構造を移動させ、支承に残留変形を与えていることも特徴として挙げられる。

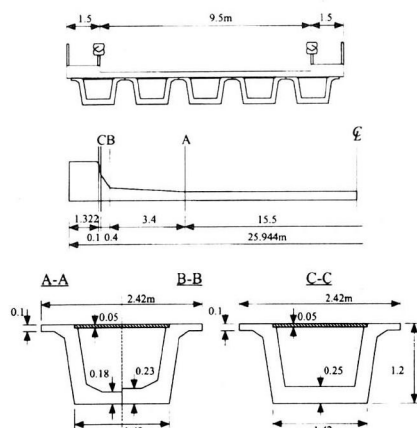
(2) Arifiye周辺の道路被害

図－2 にArifiye地点周辺の高速道路と高速道路をオーバースする道路橋、ならびに河川横断橋梁の配置を、地震断層の位置とともに模式的に示す。図に示すように高速道路は、西から東へと全体的に北へと方向を変えながら東西方向に走るが、蛇行を繰り返し、この間に高速道路をオーバースする4つの道路橋（No.1～No.4）を通過する。地震断層の走行はほぼ東西方向であるので、断層を東西の点線で記すと、断層はNo.1橋梁とNo.2橋梁の間で高速道路を斜めに横切り、No.2橋梁の北側橋台付近を通過して、再びNo.4橋梁の手前で高速道路を斜めに横切っていることがわかる。さらに断層は河川（Sakarya川）の左岸をかすめ、トヨタ自動車合弁工場（TOYOTA SA.）の敷地内へと連続している。以下に、これら5橋梁を対象として実施した調査結果をまとめる。

(a) Arifiye橋（No.3橋梁）

Arifiye橋（Arifiye Viaduct）は両端の橋台と3基の壁式橋脚で支持された4径間単純PC斜橋（斜角約65度）であり、床版は連続していた。中央部の2径間が高速道路を、また両端の2径間が高速道路の両側の側道をオーバースしている。橋長は4@26m＝104mであり、有効幅員は12.5mである。ここでは、北側から順に、A1橋台、P1、P2、P3橋脚、A2橋台と呼ぶこととする。地震により4径間とも南側の端が落下する形で落橋した。上部構造は、プレキャストUビームを5本横に重ねた構造となっており、桁の断面は図－3に示すとおりである。

本橋を調査した9月7日段階では、すでに写真－1に示すように上部構造は撤去されており、A1、A2橋台と、P1、P3橋脚のフーチングの一部を残すのみとなっていた。写真－1、写真－2は、それぞれ、A1橋台、A2橋台を示したものである。



図－3 Arifiye橋の桁断面



写真－1 Arifiye橋A1橋台



写真－2 Arifiye橋A2橋台

中央のP 2 橋脚のフーチングはすでに撤去されたためか、すでに埋め戻しされていた。積層ゴム支承は写真- 3 に示すように30 c m×30 c m程度の平面寸法で、厚さは約10 c mであり、上鋼板や下鋼板はない。固定、可動の区別があったわけではなく、恐らく、単にゴムパッド上に桁が設置されていたのではないかと考えられる。鉄筋のかぶり厚は、基礎、フーチングでは75mm、橋脚部では50mmである。コンクリート強度は、躯体コンクリートでは、30MPa、鉄筋強度（降伏強度）は420Mpa（以上）である。

被害は、A 1～P 1 間の桁はほぼ水平に、また、P 1～P 2、P 2～P 3、P 3～A 2 間の3 連の桁がいずれも桁の南端が落下する形で落橋した。A 2 橋台では、橋軸直角方向の鉄筋コンクリート製桁移動制限装置がボックス桁間と両側面（合計6 個）に設置されていたが、東側側面の桁移動制限装置を除いて、これらが写真- 4 に示すように損傷していた。クラックの入り具合から見て、東から西方向に向けて大きな力が桁からA 2 橋台に作用したことがわかる。1 個の桁移動制限装置には、3 本ずつ5カ所に計1 5本の鉄筋が橋軸直角方向面に配置されている。A 2 橋台上には数個のゴム支承が残されていたが、いずれも水平方向に残留変位を生じており、水平方向に大きな力を受けたことを示している。A 2 橋台側の裏込め盛土に大きな沈下は生じていない。これに対して、北側のA 1 橋台では裏込め盛土が約1 m沈下しており、側面のテールアルメ部においても写真- 5 に示すようにコンクリートブロックが大きくゆがみ、大きな相対変位が生じたことを表している。ただし、A 1 橋台では橋軸直角方向の移動制限装置にはそれほど大きな損傷は生じていない。

P 1 橋脚を支持していたフーチングには、損傷は生じていない。フーチングの平面寸法は、橋軸方向には5.3m、橋軸直角方向には14mである。橋脚は壁式で、橋軸方向の壁厚は1 m、橋軸直角方向の幅13.65mである。フーチング上には写真1. 8 に示すように橋脚下端の鉄筋が残されている。径22mmの丸鋼が250mm間隔でダブル（？）に配置されている。配力筋は径16mm、250mm間隔で配置されていた。また、帯鉄筋は径16mm方向には1000mm向には500mm間隔で配置されていた。

9 月8 日に本橋を再調査した際には、P 3 橋脚のフーチングが撤去された段階で、写真1. 9 に示すようにフーチング下には約1. 2m軸方向に) @ 4 本 = 8 本配置されているのが確認された。杭の主鉄筋は直径32mmもしくは20mmの丸鋼で、杭1 本あたり12本配置されていた。径3mmスパイラル筋が杭の上部では75mm間隔で、また、下部では150mm間隔で配置されていた。

シュミットハンマを用いてA 2 橋台の前面コンクリートの強度を3 回測定した結果、それぞれ55 MP a、60MP a、52MP aであり、平均すると56 MP aであった。また、P 1 橋脚を支持していたフーチング上面では、46、50、46MP aであり、平均



写真- 3 ゴム支承

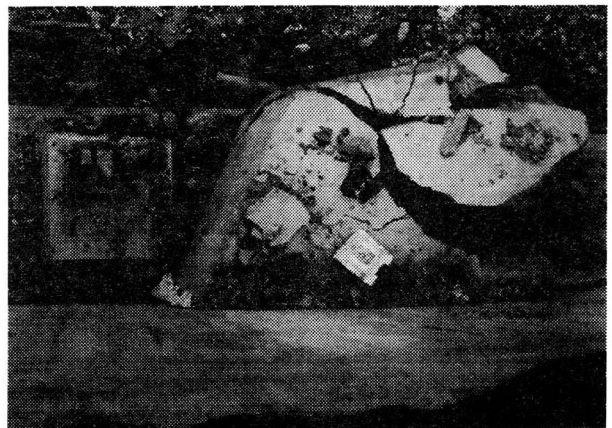


写真- 4 A 2 橋台の桁移動制限装置の損傷

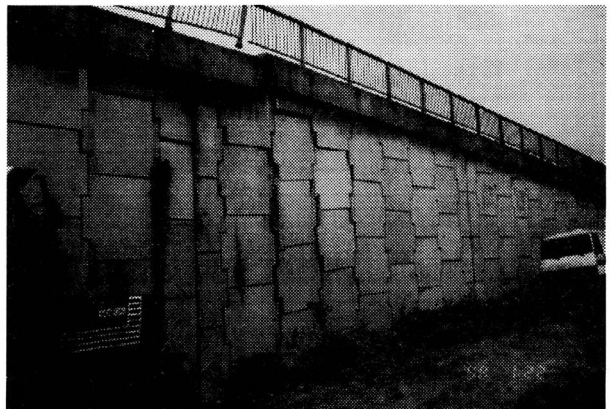


写真- 5 A 1 橋台側部テールアルメの損傷

すると47MP aであった。上述したように、躯体コンクリートの設計基準強度は30MPaであり、コンクリート強度に関しては全く問題はない。建築物の柱の強度を測定すると、コンクリートがまわっているシュミットハンマーで測定が可能な箇所では一般に16～25MP aであり、コンクリートがまわっていない箇所では1 0 MP a以下と推定される。こうした建築用のコンクリートに比較すると、本橋に限らず橋脚コンクリートの強度はしっかりしたものであった。

断層は、本橋のA 1 橋台とP 1 橋脚の間をほぼE W方向に横切っていた。A 1 橋台とP 1 橋脚の下

を横切る側道にはA 1 橋台から5m程度の位置に下水道管とマンホールが設置されており、この下水道管が目測によれば4 m程度軸線直角方向にずれているのが確認され、断層がこの位置を横断したことを示していた。

下水道管に損傷をもたらした断層を東側にたどっていくと、数軒の家屋に損傷をもたらした後、トゥモロコシ畑を抜け、ポプラ林に入っていく。ポプラは数列にわたり整然と植えられていたが、この列が写真-6 に示すように、断層によって切断されていた。断層変位を計測すると、ある列では3.5 m、その隣の列では4.3mであった。また、下水道管を横切った断層を西にたどると、やがて高速道路を浅い角度で横断するが、その手前では排水用の直径1.4mのコンクリート製ヒューム管が写真-7 に示すように軸線直角方向にずれていた。この移動量を計測すると、3.6mであった。こうした点から見て、本橋周辺では3.5～4.3m程度の断層変位が生じたことは確実である。

こうした断層運動に伴い、A 1 橋台を基準とすれば、P 1 橋脚～A 2 橋台が橋軸方向にはA 2 側に、また、橋軸直角方向には西側に大きく変位したと考えられる。橋軸方向の向きと断層の方向からみて、断層は橋軸方向から約65度の角度で本橋を横断したと考えられることから、A 1 橋台を基準とすれば、これに最も近いP 1 橋脚では、橋軸方向、橋軸直角方向の変位 d_{LG} 、 d_{TR} は、以下のように推定される。

$$d_{LG} = \Delta \times \sin 65^\circ = 4.0 \times \sin 65^\circ = 3.63 \text{ m}$$

$$d_{TR} = \Delta \times \sin 65^\circ = 4.0 \times \cos 65^\circ = 1.69 \text{ m}$$

ここで、 Δ は断層変位であり、上述の断層移動量から4 mと仮定した。

P 2、P 3、A 2 と断層から離れるに従い地盤の移動量は減少したと考えられるが、こうした断層変位が基礎に作用した結果、いずれの桁も橋台もしくは橋脚から南端側から落下したのではないかと考えられる。A 1 橋台位置では橋軸直角方向の桁移動制限装置がほとんど損傷を受けていないのに対して、A 2 橋台側では西側に向かって桁移動制限装置に力が作用したのは、断層がA 1 橋台～P 1 橋脚間を横断したため、この間が開き、桁が単純に落下したのに対して、A 2 橋台ではP 3～A 2 間の桁がA 2 橋台と衝突し、このため橋軸直角方向西向きの力が作用したためと考えられる。

(b) Arifiye橋周辺の高速道路オーバーパス

落橋したArifiye橋周辺で図-2でNo.1、No.2ならびにNo.4で区別したオーバーパス橋梁の調査結果をまとめる。まず、図のもっとも東側に位置し、Toyota 合併自動車工場 (TOYOTA SA) とTOYOTA病院の中間に位置する写真-8 の2径間単純のオーバークロッシング (No.1橋梁) では、橋の西側50 m程度から南側の橋台付近を断層が通過した。この橋はArifiye橋と同じく壁式橋脚を採用し、積層ゴム支承によって支持されている。側道がなく本線部だけを横断するため2径間となっている。上部構造はプレキャストUビームを4本並べた形式となっている。



写真-6 ポプラ林で確認された断層のずれ

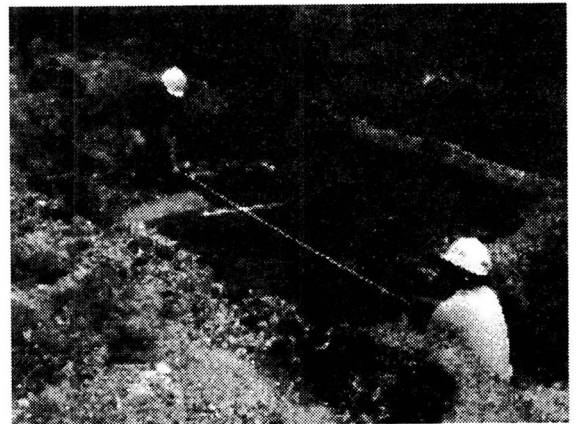


写真-7 断層による配水管のずれ

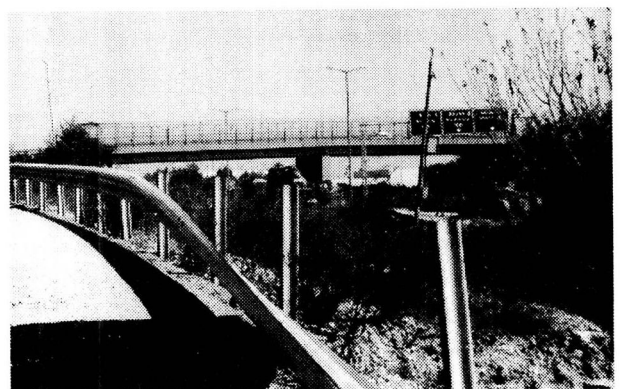


写真-8 No.1橋梁全景
(手前左から右橋台にかけ断層が走っている)

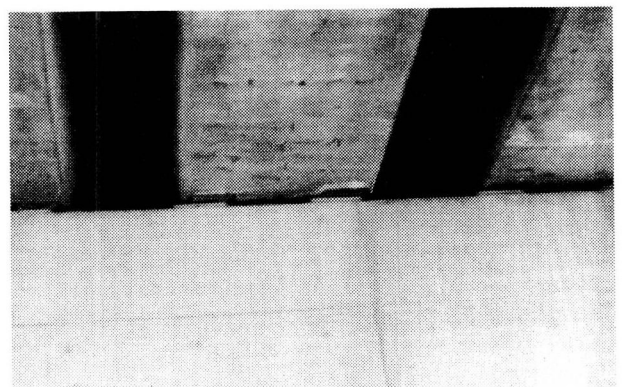


写真-9 桁の残留変位を表す積層ゴム支承 (No.1橋)

橋本体には地震動による損傷は特に認められない。これは橋脚高さが約5mと低く、両端を橋台で拘束された構造形式のため、橋としての振動が生じにくかったためと考えられる。地震により積層ゴム支承には写真-9に示すように橋軸直角方向（南西側）に向かって最大5cm程度の残留変位が生じていた。これは、本橋が断層の北側に位置したため、橋脚が橋軸直角方向（北東側）に移動した結果、積層ゴム支承にはこれとは反対方向の残留変位が生じたと考えられる。なお、No.1橋梁の南側取り付け道路の盛土が断層で寸断された他、南側の橋台では前面の押さえ盛土が沈下し、橋台側部の被覆コンクリートが剥離した。

No.1橋梁のさらに約400m西に位置するオーバークロッシング（No.2橋梁）は、上部構造がプレキャストUビームを5つ並べており、南側に側道があるため、本線部2径間+側道部1径間の計3径間単純橋となっている。損傷は全体として軽微であるが、北側の橋台（A1）において写真-10に示すように前面のパラペットが壊れ、このコンクリート片が橋軸直角方向の移動制限装置上に散乱しており、桁がA1橋台に衝突したことによるものと考えられる。本橋梁でもNo.1橋梁と同様に、橋脚上の積層ゴム支承が桁とともに2～3cm程度橋軸直角方向に移動したが、移動方向は東側であり、橋脚が相対的に西側へとずれていることになる。No.1橋梁では断層は橋梁の南を走っており、No.2橋梁では断層が橋梁の北側を走っていることから、断層より北では全体的に地盤が東へ、逆に断層より南では全体的に地盤が西へと移動したと推定できる。

No.2橋梁から約100m離れた位置（高速道路の北側）にArbas自動車工場（Arbas Arac Kadlma Fabzikasi）があるが、この敷地の南西コーナーにあるコンクリート製フェンスが写真-11に示すように地震断層によって右横ずれで移動した。移動量は4.3mに達する。この断層はさらに西進し、軍用地の西側境界にあるコンクリート製壁を突き抜け、トウモロコシ畑につながっている。この先、断層はさらに西進し、後述するように鉄道線路を横断して軌道に被害を与えた後、前述したポプラ林（ここでの移動量は3.5～4.3m）を経由して落橋したArifiye橋に達している。

Arifiye橋から約400m西側に位置するNo.4橋梁は、写真-12に示すようにNo.2橋梁と同じくプレキャストUビームを5本並べた3径間単純橋である。この橋梁ではNo.2橋梁と同様に橋台において前面のパラペットが壊れた以外は、目立った被害は生じていなかった。Istanbul方面行きの車線（北側の車線）に、幅5mm程度のクラックが道路を横断するように生じており、橋台前面の盛土斜面のブロックにも同様にクラックが生じていた。図-2よりわかるように、この橋の東を断層が斜めに横切ったため、No.3～No.4橋梁の間では道路の補修が必要となった。調査時点ではIstanbul行きの車線の補修を終えており、この車線を対面通行として利用し、



写真-10 No.2橋梁の橋台支承部の損傷



写真-11 地震断層によって水平移動したフェンス



写真-12 No.4橋梁の損傷状況

Ankara行きの車線（南側の車線）で舗装の打ち換え工事が行われていた。

(c) Toyota病院周辺の河川横断橋（No.5橋梁）

図-2のNo.4橋梁から南下し、Sakarya川を横断する道路橋（No.5橋梁）である。写真-13に示すように、橋の中央部は完全に水没し、両岸の2径間部分だけが岸側を上、川側を下に大きく傾斜するという特異な被害を生じた。川幅から推定すると、4径間（もしくは3径間）単純橋と推定される。北側の橋台（A1橋台）位置では、写真-14に示すよう

に桁は川下側（東側）に約3 m移動した位置で落下している。A1橋台における桁かかり長は60cmである。兩岸の橋台を結ぶ位置に相当するあたりに流木がたまった箇所が3カ所あり、恐らくこれが転倒した橋脚の位置ではないかと考えられる。

川の左岸側（北側）に沿って断層が通過しており、これが写真-15に示すようにA1橋台の背面あたりを直撃している。この断層に伴う地盤の変位により、橋台に対して橋脚が川下側（東側）に引き倒された結果、桁が落下したと推定される。



写真-13 No.5橋梁の落橋状況

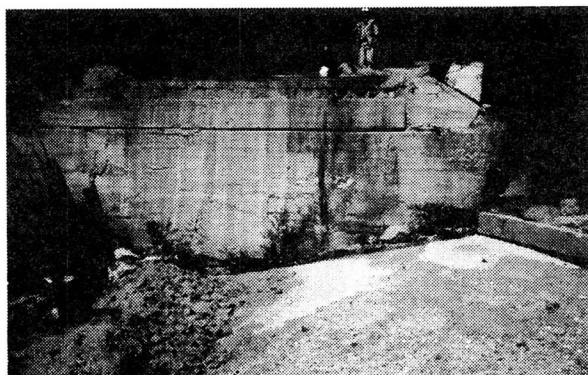


写真-14 No.5橋梁A1橋台橋台と落ちた桁

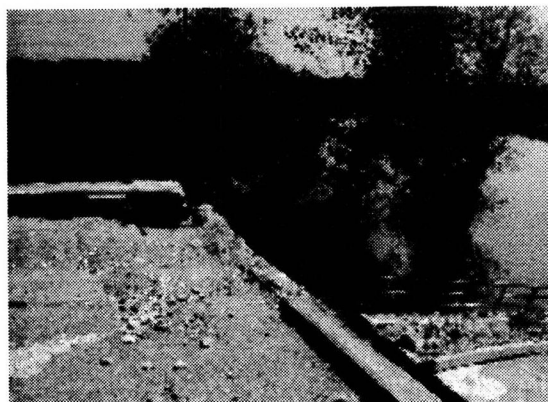


写真-15 左岸堤防下部を通過する地震断層

(3) 製紙工場の栈橋への連絡橋

道路ではないが、橋梁の被害ということで、ここに示しておく。本橋は、KocaeliにあるSEKA製紙工場の栈橋に連結するコンクリートスラブ橋であり、写真-16に示すように全体で約30径間程度が2 m

以上沈下した。橋脚は直径800mmの円形断面で、海面付近から下は鋼管杭となっている。主鉄筋は径30mmの丸鋼で、帯鉄筋としては径10mmの丸鋼が150mm間隔で配置されていた。橋脚の上部は桁と剛結されている。

地震により、岸側に近い11径間部分で、写真-17に示すように、橋脚の中間高さでせん断破壊が生じた。せん断耐力の不足と考えられる。なお、本橋の周辺では、断層運動の痕跡は認められない。

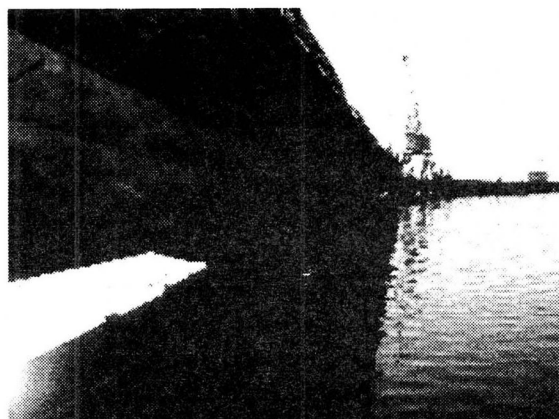


写真-16 SEKA製紙工場栈橋への連絡橋



写真-17 橋脚のせん断破壊

(4) その他

Sakaryaの東で高速道路がSakarya川を横断する地点では、橋梁の取り付け部の盛り土が沈下して段差が生じ、桁が橋台と橋軸直角方向に10cm近くずれる少しずれる被害が発生しているが、それより東では、道路、橋梁の顕著な被害は発生していない。

一方、断層より西では道路施設にほとんど被害が発生していないといってよい。IstanbulとKocaeliの間には、いくつか大きな橋梁区間がある。とくにKicaeliの中心部より約2 km北上した地点の高速道路の高橋脚部であるが、多少支承部に地震による移動の痕跡が認められるものの、無被害の状態である。なお、Istanbulにおいては地震動は比較的小さく(80gal度)、ほとんどが丘陵地で岩盤上であるため地震動の増幅もさほどないため、道路施設に被害は生じていない。ボスポラス橋は第1、第2とも無被害であり、これが被災地の復旧に重要な役割を果たした。

3. 鉄道施設の被害

(1) 概要

コジャエリ地震による鉄道施設の被害は、地震の規模と比較すると小さかった。鉄道が高架となっていてのはIstanbulのみであり、また駅舎の倒壊が発生しなかったことが、被害を小さくとどめた原因であろう。しかし、鉄道線路が3箇所地震断層と交差することとなり、線路が断層変位によって大きく湾曲させられることになった。以下に、これら3箇所の被害状況を紹介する。

(2) Tepetarla駅周辺での線路の蛇行

TepetarlaはSapanca湖の西に位置する小さな村である。Tepetarla村ならびにその東に位置する高速道路の位置関係を、模式的に図-4に示す。KocaeliとSapancaのほぼ中間にTepetarla駅があり、駅から北へ約150m程度の位置において、1.5m程度盛土をした上に軌道が設置されていた個所を断層が横断し、線路の湾曲が生じた。航空写真から判断すると、湾曲の大きさは3m程度と考えられる。調査時点（9月9日）ではすでに大きな湾曲は修復されていたが、まだ、写真-18に示すように300m程度の区間にわたってゆっくりした湾曲が残されていた。線路の両側には断層の動きがはっきり残されており、これが断層運動によって生じた損傷であることは間違いない。断層の向きはほぼEWであり、線路の方向はN30°Wであることから、断層は約60°の角度をもって線路を横断したことになる。写真-19に地震後に撤去された枕木を示したものである。レールの蛇行の半波長は4m程度であり、したがって、8m程度の波長でレールの蛇行が生じたと推定される。

線路から断層を西方向にたどると、約150m離れた位置にポプラ林がある。ここでも木はもともと一列に植えられており、これが断層により写真-20に示すように右横づれに切られていた。このずれ量から断層変位を推定すると、水平変位が2.5mであった他、さらに断層の南側は約1m沈下していた。

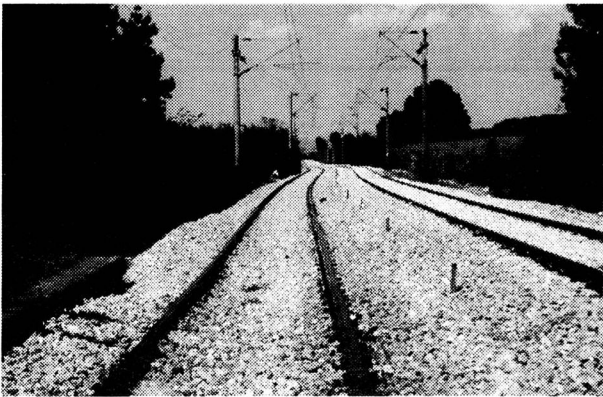


写真-18 Tepetarlaでの鉄道線路の湾曲

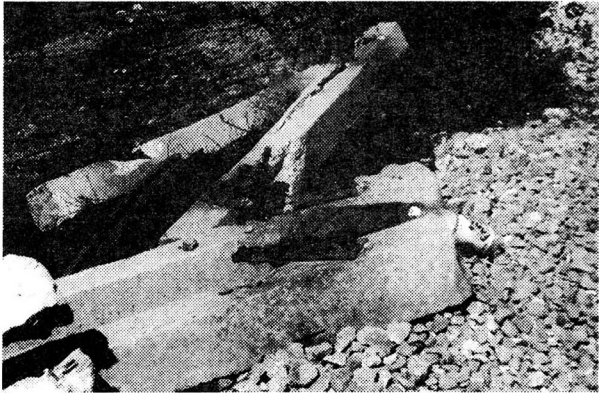


写真-19 撤去された枕木



写真-20 ポプラ林を横断する地震断層

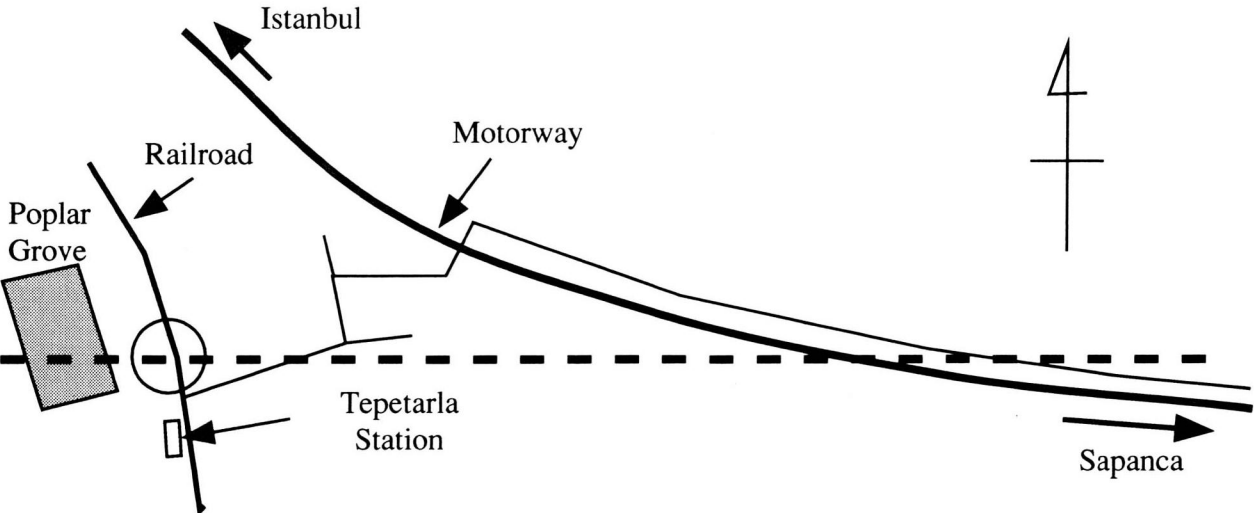


図-4 Tepetarla駅周辺の鉄道、高速道路の配置と地震断層

(4) Sapanca湖の南岸地点の線路の蛇行

Sapanca湖の南岸沿いでは、線路の補修歴が認められた。この箇所では、高さ8～10mの段丘上に高速道路が、その下を鉄道と側道がほぼ南北に走っている。断層はこれをほぼ東西方向に横断し、このため湖岸のコンクリート擁壁が230mm横方向（護岸の軸方向に直角方向）にずれており、さらに段丘面に建設されていたコンクリート製擁壁にも損傷を与えている。補修された枕木（RC製）のうち、断層面から北側に存在する38本はいずれも上面が北側に回転している。これは、断層運動に伴いレールには北向きの力が作用し、このため、枕木が回転したものを、そのままの形で応急的に復旧したためと考えられる。

軌道の横には、撤去されたレールや枕木が残されていたが、レールは大きく湾曲しており、枕木も中央部で鉄筋が露出する程に損傷している。この断層は、Sapancaの湖岸の別荘に甚大な被害を与え、Sapancaテルの南を横切り、湖岸の施設を破壊しながら湖中へと東方向へ消えた主断層に平行する副断層であり、再び湖の東南の湖岸に上陸したものと考えられる。断層は、高速道路下を通過してさらに東へと延長していると思われるが、鉄道背面の高速道路のコンクリート擁壁に2本縦にクラックが入ったが、高速道路自体には大きな被害を与えなかった。

(4) Arifiye橋周辺の線路の蛇行

Arifiye橋の北東約500mの位置では、Arifiye橋を落橋させたと同じ断層が鉄道を横断した。線路はほぼ南北方向で、これにはほぼ東西方向に断層が線路を横断している。補修後もレールは約100mにわたって1.8m程度蛇行しており断層運動によって生じた食い違いをとりあえず100m区間にわたって吸収する形で復旧したことを示している。調査した時点（9月8日）では、架線の支持ボールの位置の移動が行われていた。軌道横には撤去、取り替えられたレールや枕木が残されていた（写真－21）。

この地点から西へ約300mの位置にはポプラ林があり、前述したように、ここでは一列に植えられていたポプラの木の移動から、断層変位が3.6m～4.5m推定されている。



写真－21 撤去されたレールと枕木

4. まとめ

Kocaeli、Golcuk、Sapanca、Sakaryaの道路、鉄道施設に被害調査を9月8日、9日の2日間にわたって実施した。この結果は、以下の通りである。

(1) 道路施設では、Sapancaに近いArifiye橋（高速道路のオーバークロッシング）、Toyota病院近くの橋（川の横断橋）が落橋した。これらは同一の地震断層によって生じた被害である。また、この地区では、ほかにも桁移動制限装置、橋台パラペット、桁、支承等の様々な被害が生じている。今回調査した範囲では、これらは断層運動によって引き起こされたと考えられる。また、このほかにKocaeli周辺の製紙工場において、栈橋に取り付く橋の沈下が生じた。これは、橋脚のせん断耐力が不足したために起こったせん断破壊によるものである。

(2) 鉄道施設としては、Sapanca湖周辺の3カ所において断層が軌道を横断し、このため軌道の蛇行が生じた。いずれも現在は復旧されているが、まだ軌道に湾曲を残したまま復旧された箇所がある。撤去されたレールは大きく蛇行し、RC製枕木も中央部分で鉄筋が露出するほど損傷を受けている。

(3) 上記のように、今回の地震では、道路施設、鉄道施設に大きな被害をもたらした原因は断層変位である。被害を受けた施設の周辺で実測できた断層変位は、最大で4.3mに及んでおり、こうした地盤変位を受けて、基礎が移動し、下部構造を移動させたり、引き倒された結果、橋梁の被害が生じており、また、直接断層変位が線路を横断した結果、軌道に被害が生じている。

(4) 建築物の被害に比較すると、道路、鉄道施設の被害は比較的小さかったが、この原因としては、以下の理由が考えられる。

(a) 橋梁のコンクリートの強度を測定すると、50MPa程度あり、建築物に使われているコンクリートよりはるかに質が良い。

(b) Arifiye橋では、フーチング下に基礎が確認されたが、基礎はしっかりした構造であった。

(c) 高速道路のオーバークロッシングは、橋脚高さが約5mと低く、2～4径間程度とスパンが短く、さらに、橋桁の両端が橋台で拘束されており、自己振動しにくい構造である。また、被災した橋梁以外に大きな構造物は存在しておらず、被害を受ける構造物自身が少なかった。

謝辞

Arifiye橋の諸元は、トルコ道路総局に出張中の帆足博明JICA専門家に調べていただいた。ここに記して厚くお礼申し上げる次第である。